УДК 535.36

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ РАССЕИВАЮЩЕГО ОБЪЕМА НА РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

Томский политехнический университет
E-mail: msb@tpu.ru

В работе исследуется перенос излучения в рассеивающих объемах различной формы. Изменение тела яркости рассеивающего объема анализируется с помощью коэффициента асимметрии. Данный коэффициент является информативной и чувствительной характеристикой, позволяющей достаточно точно оценить распределение рассеянной радиации.

Расчет углового распределения яркости излучения (поля яркости), рассеянного пространственно ограниченным объектом, является составной частью исследований переноса излучения в дисперсных средах [1, 2]. Получение подробной информации о таких полях сопряжено с определенными трудностями как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. В связи с этим, имеет смысл ввести некий интегральный параметр, позволяющий оценить конфигурацию поля рассеянной радиации. В теории рассеяния конфигурацию поля излучения обычно определяют с помощью тела яркости в случае большого рассеивающего объема

или индикатрисы рассеяния излучения элементарного объема. Индикатриса рассеяния содержит полную информацию об угловой структуре рассеяния, но если в такой информации нет необходимости, то достаточно знать степень анизотропии рассеяния, определяемую коэффициентом асимметрии.

Тело яркости и индикатриса рассеяния характеризуют угловое распределение излучения внутри рассеивающего макрообъема. Однако, определение этих характеристик внутри среды в ряде случаев связано со значительными трудностями, поэтому обычно рассматривают угловое распределение вне рассеивающего объема. По аналогии с коэффициентом асимметрии индикатрисы рассеяния элементарного объема $a=(\eta+2\mu)/(\beta+2\mu)$ ($\eta$, $\beta$, $\mu$ определены в [3]) целесообразно определить коэффициент асимметрии излучения, рассеянного макрообъемом:

$$A_\Sigma = \frac{I_{+\xi} + B}{I_{-\xi} + B}, \quad (1)$$

где

$$B = \frac{I_{+\psi} + I_{-\psi} + I_{+\zeta} + I_{-\zeta}}{2}. \quad (2)$$

Здесь $I_{+x}$ – поток излучения, прошедшего среду; $I_{-x}$ – поток, отраженный средой; $I_{\pm y}$, $I_{\pm z}$ – потоки рассеянного излучения, выходящие из среды в направлениях ±y, ±z.

Примером использования вышеприведенных формул являются результаты расчетов, приведенных на рис. 1–4, которые позволяют минимизировать число измерений тела яркости и проследить его деформацию, используя введенные параметры.

Рассмотрим результаты исследований поля радиации пространственно ограниченного рассеивающего объема в зависимости от оптических размеров и параметров среды. Форма тела яркости объема оценивалась с помощью формулы (1).

Рассмотрим зависимость коэффициента асимметрии, определяемого соотношением (1), от оптической толщины рассеивающей среды (рис. 1).

Расчеты проводились для двух индикатрис рассеяния с коэффициентами асимметрии $a_1 = 1$ (сферическая индикатриса рассеяния) и $a_2 = 12$ (анизотропная индикатриса рассеяния); поперечных оптических размеров $\tau_y=\tau_z=10$ и вероятностей выживания кванта $\Lambda=1$; 0,95. Очевидно, что поле радиации формируется из многократно рассеянного света и ослабленного по закону Бугера. По мере увеличения оптических размеров среды вклад многократно рассеянного света возрастает, в то время как влияние бугеровской составляющей падает. Этим фактом и объясняется более резкая зависимость коэффициента $A_s$ от $\tau_x$ для среды, характеризуемой анизотропной индикатрисой рассеяния.

Появление поглощения в среде увеличивает $A_s$ в области малых оптических размеров (кривые 2, 3), что объясняется уменьшением доли многократно рассеянного света в общем радиационном балансе.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента асимметрии от поперечных оптических размеров среды, причем ситуация смоделирована таким образом, что продольный и один из поперечных оптических размеров $\tau_z$ фиксированы. Подобные ситуации могут реализоваться в атмосферной оптике и оптике океана. Расчеты проведены для тех же двух индикатрис рассеяния, что и в предыдущем случае, и консервативной среды ($\Lambda=1$). Полученные данные показывают достаточно слабую зависимость коэффициента $A_s$ от оптических размеров среды, если два размера среды фиксированы, а третий

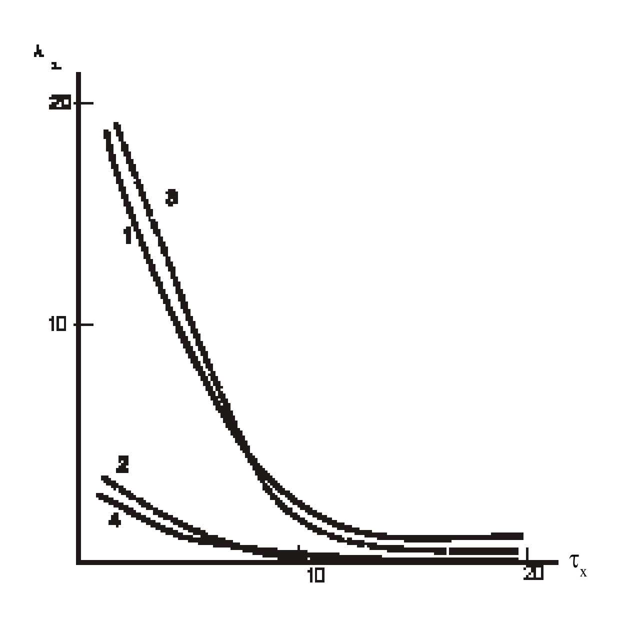



Рис. 1. Зависимость коэффициента асимметрии $A_s$ от оптической плотности среды $\tau_x$ при $\tau_y = \tau_z=10$: 1) $\Lambda = 1$; $a_2 = 12$; 2) $\Lambda = 0,95$; $a_1 = 1$; 3) $\Lambda = 0,95$; $a_2 = 12$; 4) $\Lambda= 1$; $a_1 = 1$

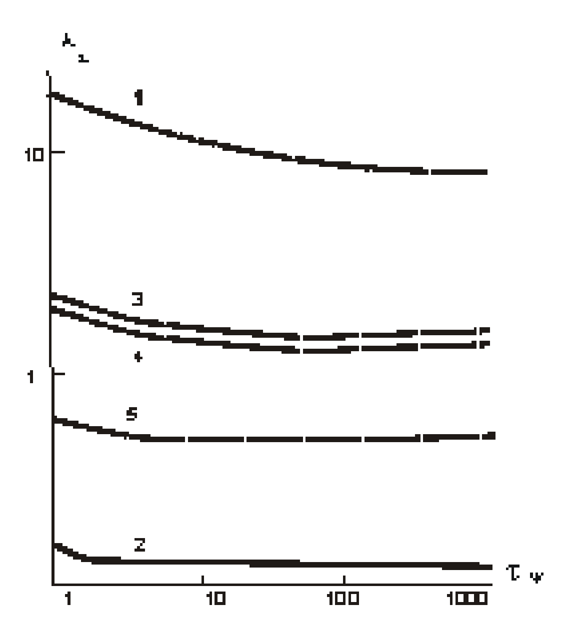



Рис. 2. Зависимость коэффициента асимметрии $A_s$ от поперечной оптической плотности среды $\tau_y$ при $\Lambda =1$: 1) $\tau_x= 1$; $\tau_z= 1$; $a_2= 12$; 2) $\tau_x= 10$; $\tau_z= 1$; $a_2= 12$; 3) $\tau_x= 1$; $\tau_z= 1$; $a_1= 1$; 4) $\tau_x= 10$; $\tau_z= 10$; $a_1= 1$; 5) $\tau_x= 10$; $\tau_z= 1$; $a_1= 1$

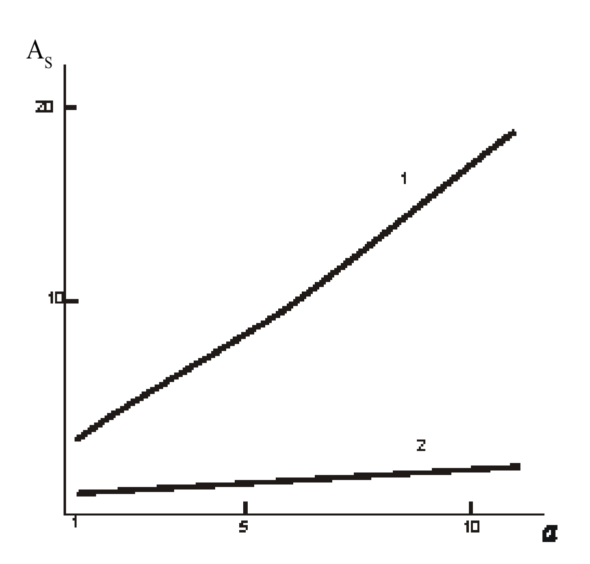



Рис. 3. Связь коэффициента асимметрии $A_s$ с показателем анизотропии индикатрисы рассеяния элементарного объема а при $\Lambda$ =1: 1) $\tau$= 1; 2) $\tau$= 10

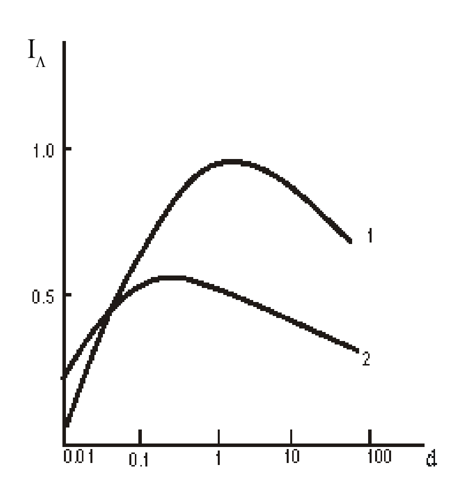



Рис. 4. Зависимость поглощения $I_\Lambda$ дисперсной среды от параметра формы d: 1) a = 12; 2) a = 1. Оптический объем среды V = 27000

изменяется. В то же время сохраняется сильная зависимость от вида индикатрисы рассеяния. Постоянство коэффициента $A_s$ при изменении оптических размеров говорит о сформировавшемся теле яркости.

Связь между макро- и микропараметрами среды приведена на рис. 3, где представлена зависимость коэффициента $A_s$ от параметра анизотропии индикатрисы рассеяния излучения частицами, составляющими среду с фиксированными оптическими размерами и имеющую форму куба $\tau_y=\tau_z=\tau_x=\tau$.

Представленные на рис. 3 результаты показывают, что между этими параметрами существует однозначная зависимость. Очевидно, что с увеличением степени анизотропии индикатрисы рассеяния, возрастает асимметрия тела яркости рассеивающего объема. Наиболее сильно эта зависимость проявляется при малых оптических размерах среды, что также объясняется уменьшением доли многократно рассеянного света в радиационном балансе.

Другим эффектом, изменяющим радиационный баланс дисперсной среды, в частности, облачной атмосферы, является эффект пространственного перераспределения рассеянной энергии при изменении формы облака (с сохранением общего числа рассеивающих частиц). Существенным обстоятельством действия данного эффекта является неизменность микрофизических характеристик дисперсной среды при рассмотрении прохождения излучения через облачные образования – таких, как распределение частиц по размерам, общее число частиц в облаке и коэффициент поглощения среды. Постоянство микрофизических характеристик обеспечивает неизменность оптических параметров дисперсной среды – индикатрисы рассеяния излучения и вероятности выживания кванта.

На рис. 4 приведена зависимость поглощения $I_\Lambda$ в отдельном облаке от параметра формы d. Под параметром формы понимается соотношение между высотой и шириной облака. Анализ результатов показывает, что наиболее интенсивное поглощение излучения наблюдается в ограниченной дисперсной среде симметричной формы. Влияние индикатрисы наиболее сильно сказывается также в случае симметричной среды; при изменении формы объема среды влияние индикатрисы становится неоднозначным: при увеличении ширины облака правильной формы поглощение уменьшается, причем такая зависимость наблюдается при любой индикатрисе рассеяния. При другой деформации среды правильной формы зависимость изменения величины поглощенной энергии имеет вид кривой с максимумом.

Зависимость коэффициента асимметрии $A_s$ рассеивающего объема от параметра формы d при условиях, изложенных выше, приведена на рис. 5. Из приведенных данных можно сделать вывод, что при рассеянии излучения объемом правильной формы коэффициент асимметрии имеет наименьшее значение. Другой вывод можно сделать на основании рис. 6: влияние поглощения на тело яркости зависит от величины оптических размеров рассеивающего объема.

Точность определения тела яркости рассеивающих объемов разной формы можно оценивать с помощью инвариантного соотношения [3]:

$$\mathrm{inv} = \frac{(1+\Lambda)[1-{}^{P}] - {}^{K}[1+{}^{P}]}{{}^{\alpha}\{{}^{K}[1+{}^{P}] - (1-\Lambda)[1-{}^{P}]\}} = 1, \quad (3)$$

где ${}^{K} = {}^{K}(\phi, \phi, {}^{\alpha}, \Lambda)$, ${}^{P} = {}^{P}(\phi, \phi, {}^{\alpha}, \Lambda)$.

Выражение (3) устанавливает связь между рассеянием излучения одной частицы среды и параметрами $R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, $K(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, характеризующими рассматриваемый объем среды в целом. В экспериментах исследовано влияние формы рассеивающего объема, индикатрисы рассеяния излучения, вероятности выживания кванта $\Lambda$ на выполнение соотношения (3).

Исследовался перенос излучения в средах, имеющих форму куба, параллелепипеда, цилиндра, равносторонней призмы, сформированных различного вида рассеивателями, как без поглощения ($\Lambda$=1), так и в присутствии поглощающих веществ ($\Lambda$=0,98). В экспериментах измерялись потоки $I_1^+(\vec{\tau})$ и $I_2^-(\vec{\tau})$, и на основании их были вычислены параметры

Таблица. Влияние формы объема среды на инвариантное соотношение

| Отношение размеров | Форма | R | K | inv | Λ |
|---|---|---|---|---|---|
| d = 31 | Куб | 0,3902 | 0,0898 | 0,9944 | 1 |
| d = 10, d = 45 | Призма | 0,3000 | 0,1120 | 0,9720 | |
| d = 20, dy = d = 150 | Параллелепипед | 0,6130 | 0,0428 | 0,9941 | |
| d = 10, d = 60 | Цилиндр | 0,3600 | 0,0820 | 1,0272 | |
| d = 20, dy = d = 130 | Параллелепипед | 0,3000 | 0,1075 | 0,9675 | 0,98 |

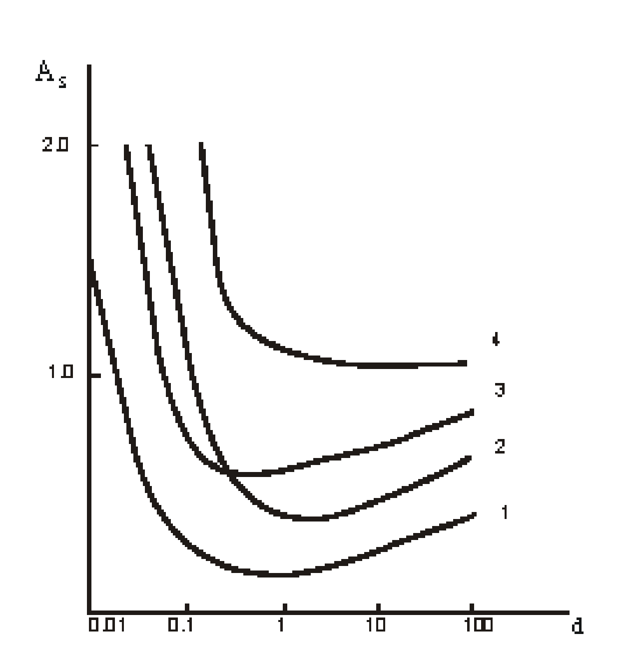



Рис. 5. Зависимость коэффициента асимметрии $A_s$ от параметра формы d: 1) a=1, V =1000; 2) a=1, V=27000; 3) a=12, V=1000; 4) a=12, V=27000

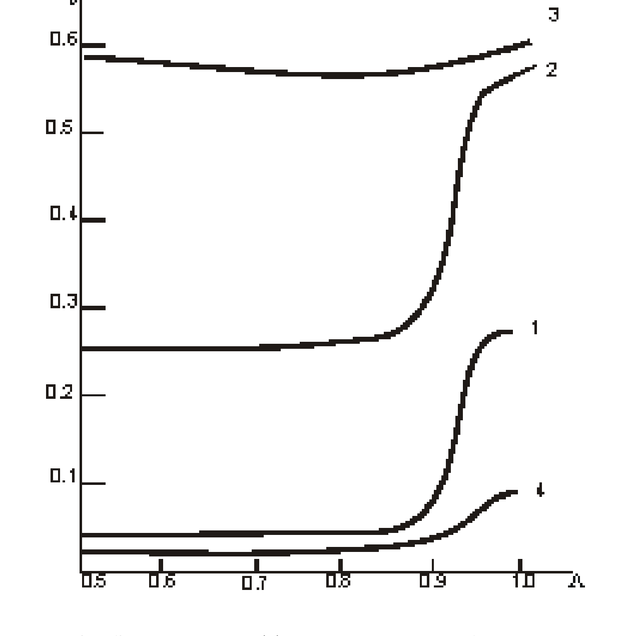



Рис. 6. Зависимость коэффициента асимметрии $A_s$ от вероятности выживания кванта: 1) a=1, V=1000; 2) a=12, V =27000; 3) a=1, V=1; 4) a=12; V=125000

$R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$ и $K(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$ [3].

В качестве рассеивающей среды использовали монодисперсные взвеси полистироловых частиц r =1,5 мкм и r =3,5 мкм, для которых коэффициент асимметрии a равен 8,68 и 10,24, соответственно. Данные расчетов $R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$ и $K(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$ сведены в таблицу.

Экспериментальные данные, приведенные в таблице, показывают, что соотношение (3) выполняется для исследованного диапазона параметров среды и излучения и является универсальной характеристикой, применимой для рассеивающих объемов различной формы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что коэффициент асимметрии является информативной и чувствительной характеристикой, позволяющей достаточно точно оценить пространственное распределение рассеянной объемом радиации, а инвариантное соотношение является универсальной характеристикой, позволяющей оценить точность расчета радиационного баланса для рассеивающих сред различной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Радиация в облачной атмосфере. Под ред. Е.М. Фейгельсон. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 280 с.
2. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 264 с.
3. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Инвариантные соотношения в теории переноса излучения // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 3. – С. 41–43.